

# 질소수지 분석을 통한 질소 배출량의 추정

Estimated Nitrogen Discharge by a Mass Balance Approach

최 의 소 · 김 태 훈  
고려대학교 사회환경시스템공학과

**Choi E and Kim T H**  
Department of Civil and Environmental Engineering,  
Korea University

## Abstract

This study was conducted to estimate nitrogen discharge from Korea (southern part of Korean peninsula) as NPS(non-point source) by mass balance approach; input and output analyses of nitrogen using existing data available. The material flow was sectorized into three different activities; agricultural (raising crop and animals), human and natural activities in forest and urban areas. Atmospheric deposition, biological nitrogen fixation, inorganic fertilizers and manures applied, animal feed and imported foodstuffs such as crops, meat and fish were the inputs in this study, while ammonia volatilization, denitrification, human and animal waste generation, crop and meat production, and discharge into river to ocean were the outputs. The estimated total nitrogen input was  $1,194.5 \times 10^3$  tons N/year and the river discharge was  $408$  to  $422 \times 10^3$  tons N/year, of which 66 to 71% was from NPS. In detail, the estimated NPS discharges were respectively  $8,274$  kg N/km<sup>2</sup>/year from agricultural area,  $730$  kg N/km<sup>2</sup>/year from forest and  $7,657$  kg N/km<sup>2</sup>/year from the other land areas such as urban and industrial area.

**Keywords** : Agricultural and urban area, Forest, Mass balance approach,  
Nitrogen discharge, Non point source

## I. 서론

연소과정에서 산화된 질소는 오존과 함께 스모그와 산성비를 형성하며, 축산분뇨 등으로부터 유실되는  $\text{NH}_3$ 는 미세 먼지를 형성하여 시야를 짧게 하는 역할을 하며 또한 수질환경에서는 부영양화와 어류에 대한 독성을 주기도 한다. 하지만 질소는 농작물 증산에 매우 효과적이어서 전 세계적으로 질소 사용량이 지난 40년간 30 tera gram ( $10^{12}$  gram)에서 2000년에는 150 teragram으로 증가되었다(Howarth, 2003). 우리 나라는 경지면적이 2,042,463 ha로써 세계 93위(OECD 21위)에 불과하지만, 질소비료 소비량이 375,000 ton(세계 28위, OECD 13위)으로 매우 높다(농림부, 2001).

우리 나라는 삼면이 바다로 쌓여 있으며 바다는 미래의 보고로 알려져 왔으나 환경문제에 있어서 바다는 내륙의 수질문제보다 경시되어 왔다. 매년 겪고 있는 적조문제는 사실상 그 원인 규명도 불확실하며 그 대책도 세우지 못하는 형편이다. 질소와 인과 같은 영양소 문제도 내륙지역의 상수원 보호라는 측면에서 최근 하폐수 처리시설에서 제거하기 시작했다. 호소나 강에서는 부영양화에 있어서 인이 제한요소이나 바다에서는 질소가 제한 요소로 작용하고 있으므로, 바다에서의 부영양화를 억제하기 위해서는 먼저 얼마나 질소를 배출하느냐를 추정해 보는 것이 중요한 일이다.

질소 배출량을 결정하는 방법으로는 직접 하천 등으로부터 바다로 유출되는 유량과 농도를 실측하여 산출하는 방법이 있으나, 강우 시에는 그 유량뿐만 아니라 농도측정이 현실적으로 어렵다. 특히, 비료나 축산분뇨의 토양살포로 인하여 농촌지역으로부터 하천으로 유입되는 질소의 양 및 유출특성은 지역마다 다르다. 따라서 어느 특정대상지역을 택하지 않고 남한 전체를 대상으로 한 질소의 유입으로부터 유출을 결정하는 물질수지 방법을 통하여 유출되는 질소량을 추정한 것이 본 연구의 방법이다. 대상지역인 남한에 유입되는 모든 질소량을 매년 발간되는 각종 통계자료와 문헌자료 등을 이용하여 추정하고 국내 현실(처리시설의 질소제거 능력 등)을 고려하여 내륙지역의 수계로부터 해양으로 공급되는 질소의 양을 추정하였다.

본 연구는 어느 일정한 지역을 대상으로 한 것이 아니기 때문에 어느 특정지역에 이를 적용하여 이용하기는 어려울 것이나 장기적인 측면에서 우리가 추구하여야 할 목표를 세우는 정책적인 가치가 있을 것이다.

## II. 연구 방법

질소의 물질수지를 세우는 방법은 IPCC(1998)에서 제시한 가이드라인을 기준으로 삼았으며, 북대서양과 그 유역(Howarth *et al.*, 1996), 남한(Bashkin *et al.*, 2002), 중국(Xing *et al.*, 2002)에서의 물질수지 결과를 참고로 하였다. 사용된 자료들은 IPCC (1998)와 OECD(2002)에서 발간된 자료들과 2001년도 환경부와 농림부, 해양수산부 등의 산하기관에서 발간된 통계자료 등을 이용하였다.

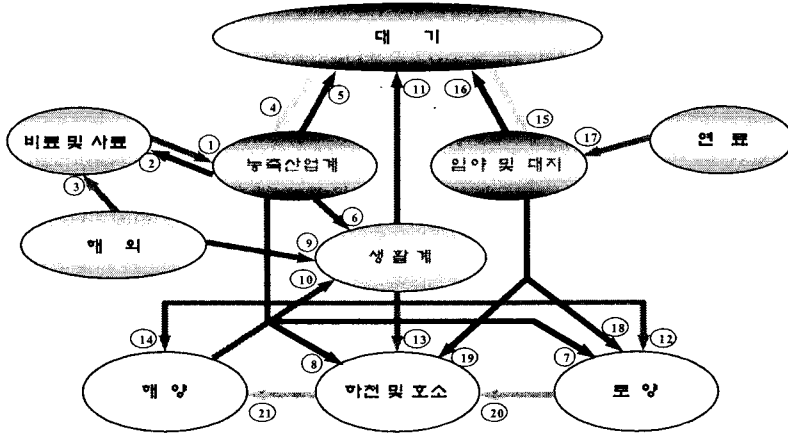
<그림 1>은 우리 나라 질소의 유입과 유출을 나타낸 개괄도이다. 물질수지를 위한 대상지역은 대한민국 전체(남한)였고, 농축산업계, 생활계, 그리고 임야 및 대지지역으로 총 3개 부분으로 나누어 질소의 흐름과정을 분석하였다. 각 분야에 있어서의 흐름과정과 다른 분야와의 관계가 화살표로 나타나 있고, 각 화살표가 의미하는 구체적인 내용은 번호로 표시하여 <표 1>에서 설명하였다.

인간의 활동에 의하여 유입된 질소량은 국내에서 생산되어 공급된 비료 및 사료의 양을 비롯하여 해양으로부터 유입되는 수산물, 해외로부터 수입되는 식료품, 그리고 연료의 사용으로 인해 대기로 배출된 양 중 습식 및 건식의 형태로 침착되는 양을 고려하였다. 인간의 활동에 의한 요인 외에 자연적인 요인으로 논, 밭 또는 임야에서 질소고정 박테리아에 의한 생물학적 질소 고정량을 고려하였다. 가축분뇨의 농지 주입량은 그 근원이 사료에서부터 비롯된 것으로 재사용량에 해당한다. 대상지역으로 유입된 양 중 유출되는 양은 크게 3가지로 나뉘어질 수가 있는데, 첫번째는 하천 및 호소와 같은 수계를 통하여 바다로 유출되는 양이 있고, 두번째는 대기 중으로 휘발되거나 탈질되는 양이었으며, 세번째는 매립, 소각, 그리고 해양투기 등의 형식으로 토양에 축적되거나 대기 중으로 방출되거나 바다로 직접 유출되는 양이다. 첫번째의 경우 축산폐수처리장이나 하수처리장에서 점오염원으로써 유출되는 형태가 있는가 하면, 농경지나 가축사육지, 또는 임야 및 대지(도시 및 공단지역 등)에 축적되어 있다가 강우 시 비점오염원으로 하천으로 유입되는 양이다. 점오염원으로써 공장폐수나 양식장 폐수를 고려할 수도 있으나 그 양이 비교적 작아 고려하지 않았다.

일반적으로 비점오염원은 유출과정이 복잡하고 그 양을 산정하기가 어렵다. 비점오염원으로부터 하천으로 유입되는 질소량을 조사하는 방법은 몇 개 지역의 대표지점을 선정하여, 그 유출특성 및 농도를 분석하고 그 결과를 가지고 회귀분석을 이용하여 총 양을 추정하는 것이 일반적이다. 그러나 대표지점이 토지이용에 대한 동일성을 유지하기가 어렵고 홍수 시에는 유량이 커서 정확한 농도를 연속적으로 실측하기가 어렵다. 그에 반해 물질수지를 사용한 본 연구는 토양이나 대기 중에 축적, 잔류하는 질소가 강우 시 수계로 얼마나 유출되는지를 결

정할 수 있을 뿐만 아니라 농축산업 활동과 일반적인 생활을 통한 질소의 흐름과 이에 의한 점원과 비점원으로부터의 유출되는 양을 추정할 수 있어 질소관리에 어느 부분이 중요한지를 한 눈에 볼 수 있는 자료로 활용할 수 있다.

<그림 1> 대상지역에서 질소의 유입과 유출을 나타낸 개괄도



<표 1> 물질수지 계통에 대한 설명 (<그림 1>참조)

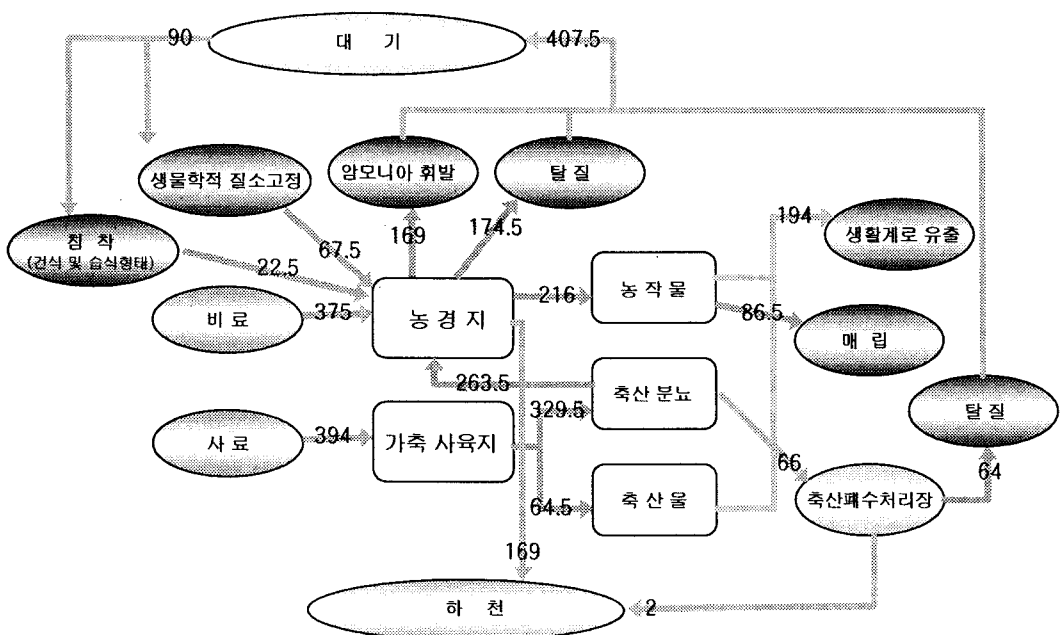
<표 1>의 순번	내용	자료 출처
1	비료 및 사료 공급	환경부(2002), 농림부(2002)
2	가축분뇨의 토양살포	IPCC guideline (Mosier et al., 1998)
3	비료 및 사료의 원료 수입	농생명과학 연구정보센터 (http://www.alric.org)
4	침착과 생물학적 질소 고정 (농경지)	박(2001), Bashkin et al.(2002)
5	농경지에서 탈질 및 휘발	Bashkin et al.(2002), Van der hoek et al.(1994), Zhu et al.(1997), Mosier et al.(1998)
6	농경지에서 육류 및 곡물 생산	국립농산물 품질관리원(2001), 보건복지부(2002)
7	토양 축적 (매립)	IPCC guideline (Mosier et al., 1998)
8	농경지에서 하천 및 호소로 유출	Mass balance를 통해 추정
9	해외로부터 식료품 수입	농생명과학 연구정보센터 (http://www.alric.org)
10	해양 수산물의 생활계로 유입	해양수산부(2002)
11	하수처리장에서의 탈질	최(2002)
12	음식물 쓰레기 매립	KONETIC (2002)
13	하수처리장에서 하천으로 유출	한국보건위생연구원(1996), 최(2003)
14	하수처리장 슬러지의 해양투기	해양수산부(2002)
15	침착과 생물학적 질소 고정 (임야 및 대지)	이(2000), 심과 박(2001)
16	연료의 연소와 탈질 및 휘발	Tilsner et al.(2003), Venterink et al.(2003)
17	연료의 사용	환경부(2002)
18	임야 및 대지에서 축적되는 양	심과 박(2001)
19	점오염원으로 유출되는 양	비교적 적은 양이므로 무시
20	비점오염원으로 유출되는 양	Mass balance를 통해 추정
21	하천을 통해 해양으로 유출	"

### III. 결과 및 고찰

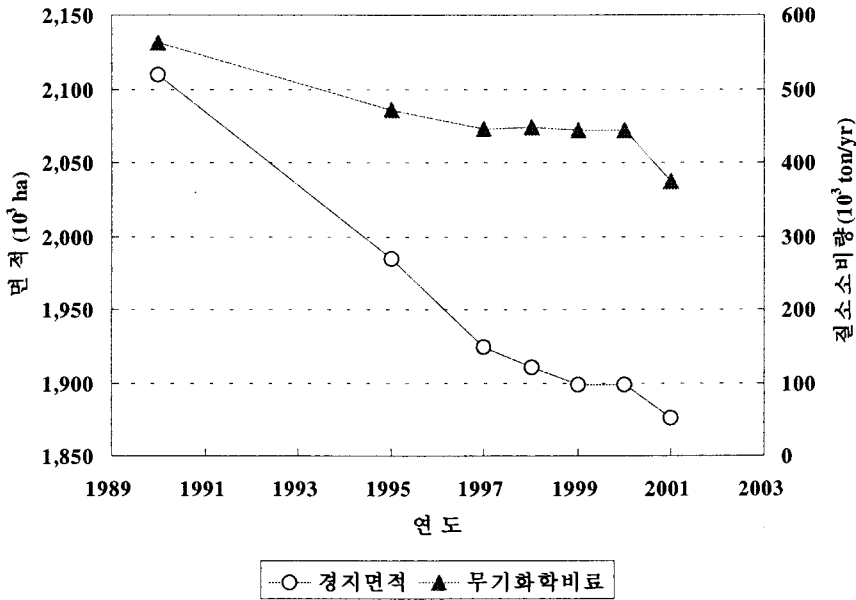
#### 1. 농축산업 활동에 의한 질소의 물질수지

<그림 2>는 농축산활동에서 유입, 유출되는 질소의 양을 나타낸 것이다. 유입량으로는 비료와 사료 공급량, 생물학적 질소 고정량, 그리고 대기 중으로부터 강우나 분진의 형태로 침착되는 양을 조사 결정하였다. 그리고 유출량으로는 비료 주입에 의해 생산된 작물에 함유된 양과 가축사료에 의한 가축분뇨의 형태로 배출되는 양과 축산물로 생산되어 생활계로 유출되는 양, 비료와 가축분뇨로부터 대기 중으로 암모니아 질소로 휘발되거나 탈질되는 양, 그리고 나머지는 잔류, 축적되어 비점오염원으로 하천으로 유출되거나 그대로 잔류(매립)되는 양을 추정하였다. <그림 3>에는 최근 10년 동안 경지면적과 무기화학비료 사용량의 변화가 나타나 있는데, 경지면적의 감소와 함께 무기화학비료의 사용량도 점차 감소하고 있는 추세이다. 단위 면적당 무기화학비료 사용량도 267 kg N/ha-yr (1990)에서 200 kg N/ha-yr (2001)로 감소하였다. 2001년도 국내에서 비료로 판매된 무기질소량은  $375 \times 10^3$  ton N/yr (농림부, 2002)이다. 그리고 가축분뇨 발생량 중 80% (환경부, 2002)정도에 해당하는  $263.5 \times 10^3$  N ton/yr의 유기질소가 퇴비화를 통해 또는 그대로 토양에 이용되는 것으로 간주하였다. 따라서 비료로 사용된 유기 및 무기질소의 양은 최대  $638.5 \times 10^3$  ton N/yr으로 추정된다.

<그림 2> 농업, 축산업계에서 질소수지 (단위 :  $10^3$  ton N/yr)



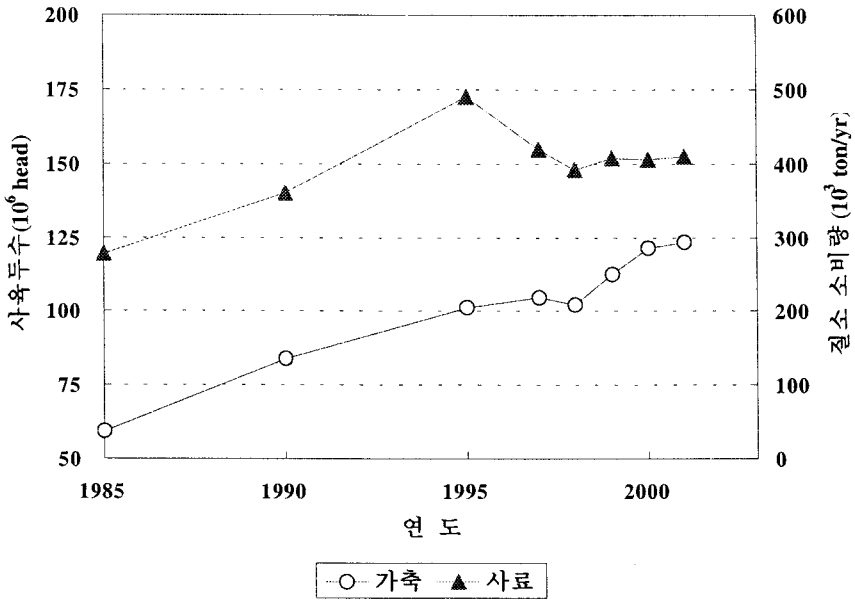
〈그림 3〉 최근 10년 동안 경지면적과 무기화학비료 사용량의 변화



〈그림 4〉는 최근 10년 동안 가축사육두수와 사료소비량의 변화를 나타낸다. 국민 1인당 단백질 소비량이 점차 증가하면서(보건복지부, 2000) 가축의 사육두수와 사료 공급량도 점차 증가하고 있는 추세이다. 국내 축산업에 이용되는 사료의 양은  $19,175 \times 10^3$  ton/yr(농림부, 2002)까지 증가하였다. 그 중 농후사료에 의한 소비량 중 국산이  $3,766 \times 10^3$  ton/yr, 수입량이  $11,077 \times 10^3$  ton/yr, 농가자급 양이  $674 \times 10^3$  ton/yr이었고 나머지  $3,881 \times 10^3$  ton/yr가 조사료 소비량이다. 농가자급 양은 외부 유입량이 아닌 재사용량이므로 물질수지에 포함시키지 않았으며, 전체 사료 내 단백질 함량이 대략 15%, 단백질 내 질소함량이 14%임을 고려하여(한국사료협회, 2002),  $394 \times 10^3$  ton N/yr이 사료에 의해 유입되는 질소량으로 산출하였다.

〈표 2〉에서는 대기 중으로부터 지표면으로 침착되는 양과 생물학적 질소 고정량을 나타내고 있다. Bashkin *et al.*(2002)에 의하면, 국내 토양에서 생물학적으로 고정되는 질소는 논에서 45 kg N/ha-yr이고, 밭은 15 kg N/ha-yr이라고 제시하고 있다. 국내 논 면적이  $12,325.99$  km<sup>2</sup>이고, 밭의 면적이  $8,098.64$ km<sup>2</sup>이므로(환경통계연감, 2002), 논에서 고정되는 양은  $55.5 \times 10^3$  ton N/yr이고, 밭에서는  $12 \times 10^3$  ton N/yr이다. 따라서 농축산업계에서 고정되는 양은  $67.5 \times 10^3$  ton N/yr이다. 또한 농경지로 침착되는 질소의 양은 11 kg N/ha-yr(박, 2001)로 발표되었는데, 이를 토대로 하면  $22.5 \times 10^3$  ton N/yr이 농경지에 침착된다. 따라서 국내 농경지에 유입되는 총 질소량은  $859 \times 10^3$  ton N/yr으로 전체 유입량의 71.9%를 차지한다.

<그림 4> 최근 10년 동안 가축사육두수와 사료소비량의 변화



<표 2> 대기로부터의 침착량과 생물학적 질소 고정량 산정을 위한 원단위

구 분	대기 침착량		생물학적 질소고정량		
	농경지	기타 지역	논	밭	임 야
면 적 (ha)	2,042,463	7,911,337	1,232,599	809,864	6,510,026
단위면적당 질소 유입량 (kg N/ha-yr)	11	17.8	45	15	6.7
총 질소 유입량 (10 <sup>3</sup> ton N/yr)	22.5	141	55.5	12	44
자료 출처	박 (2001)	이 (2000)	Bashkin et al. (2002)		심과 박 (2001)

<그림 2>에서 농축산활동으로부터 생활계로 유출되어 식료품으로 사용되는 농축산물 내 질소함량은  $194 \times 10^3$  ton N/yr인데, 농작물 수확에 따른 질소 유출량은  $129.5 \times 10^3$  ton N/yr(표 3)이고, 축산물에 의한 것이  $64.5 \times 10^3$  ton N/yr(<표 4>)이다. 이 양은 생활계로 유입되어 식료품으로 사용되어진다. 식료품으로 사용되어지는 부분 이외에 알갱이를 제외한 식물의 줄기 등과 같이 이용되지 않는 부분은 잔류물로서 남게 되는데 IPCC(Mosier *et al.*, 1998)에 의하면 이 부분에 질소가 약 40% 포함되어 있다. 이를 토대로 할 때에 총 농축산물 생산량이 약  $216 \times 10^3$  ton N/yr으로, 먹지 못하는 부분에 포함된 질소는  $86.5 \times 10^3$  ton N/yr으로 추정된다. 이러한 잔류물들은 일부는 퇴비화를 통해 비료로 재사용되거나 가축의 사료로 쓰이고 일

부는 소각되기도 하는데 대부분 토양에 잔류한다.

<표 3> 농산물 수확을 통해 식료품으로 이용되는 질소의 양

종 류	수확면적 <sup>a)</sup> (10 <sup>3</sup> ha)	단위면적당 생산량 (10 <sup>3</sup> kg/ha-yr)	생산량 <sup>a)</sup> (10 <sup>3</sup> ton/yr)	g 단백질/ 100g 증별 <sup>b)</sup>	N 생산량 (10 <sup>3</sup> ton N/yr)
쌀	1,083	6,838	7,407	8.8	91.2
보 리	91	4,223	383	9.2	4.8
밀	1	3,105	3	10.6	0.0
옥수수	14	4,027	57	9.4	0.8
감 자	25	24,447	604	2.2	1.9
고구마	13	21,473	273	1.2	0.5
두 류	99	1,417	140	33	6.4
채소류	3,35		10,496	1.5	22.0
과실류	167		2,488	0.6	2.0
계	1,828				129.5

a) 국립농산물 품질관리원 농업정보통계과 (2001)

b) 보건복지부 (2002)

<표 4> 식료품으로 이용되는 축산물에 함유된 질소의 양

종 류	생산량 <sup>a)</sup> (10 <sup>3</sup> ton/yr)	g 단백질/ 100g 증별 <sup>b)</sup>	N 생산량 (10 <sup>3</sup> ton N/yr)
쇠 고 기	233	20	6.5
돼지고기	938	20	26.3
닭 고 기	382	20	10.7
계 란	529	13.7	10.2
우 유	2,339	3.3	10.8
계			64.5

a) 농림부 (2003) “통계로 보는 세계 속의 한국농업”

b) 보건복지부 (2002)

가축분뇨에 의한 질소 원단위 발생량을 이용하여 배출되는 질소량을 추정하였다. 원단위 자료는 IPCC(Mosier *et al.*, 1998)에서 제시하고 있는 동아시아에서의 대표치를 사용하였다. 그 결과 가축분뇨에 의한 질소 발생량은 <표 5>에서 보는 바와 같이  $329.5 \times 10^3$  ton N/yr이며, 그 중 80%가 앞서 말한 바와 같이 퇴비화되어 농경지에 환원되고 강우 시에는 비점오염원으



로 유출이 가능하다. 나머지 20% 가량인  $66 \times 10^3$  ton N/yr이 축산폐수 처리시설로 유입되는데, 그 중 74%는 질산화-탈질 과정으로, 20%는 ammonia stripping으로 대기 중으로 방출되며, 3% 정도가 슬러지나 struvite의 형태로 토양에 매립되며, 3% 정도가 하천으로 방류되므로(최, 2003), 국내 축산폐수처리장에서 제거되는 질소는 거의 대부분 대기 중으로 방출( $64 \times 10^3$  ton N/yr)되었다고 추정된다. 축산폐수처리장에서 처리되어 방류되는 양은  $47,782.9 \times 10^3$  m<sup>3</sup>/yr( $2 \times 10^3$  ton N/yr)이며 평균질소농도는 약 50mg/L로 추정된다.

<표 5> 국내의 가축분뇨에 의한 질소의 원단위 발생량

종 류	N 배출량 <sup>a)</sup> (kg/head-yr)	마리수 <sup>b)</sup> (10 <sup>3</sup> head)	N 발생량 (10 <sup>3</sup> ton N/yr)
소	46	1,954	89.5
돼 지	20	8,720	174.5
가 금 류	0.6	109,036	65.5
계			329.5

a) IPCC guide line (Mosier *et al.*, 1998)

b) 환경통계연감 (환경부, 2002)

퇴비화되어 재사용되거나, 토양에 살포된 축산분뇨의 경우 50%가 암모니아성 질소(NH<sub>3</sub>-N)의 형태로 휘발되므로(Van der Hoek, 1994) 그 양은 대략  $131.5 \times 10^3$  ton N/yr로 산출되며, 무기화확비료로 쓰인 양 중 10%(IPCC, 2002) 정도가 휘발되므로 그 양은  $37.5 \times 10^3$  ton N/yr로 산출된다. 따라서  $169 \times 10^3$  ton N/yr가 농경지 및 가축사육지로부터 대기 중으로 휘발된다. 무기화확비료로 주입된 질소 중 32%가 논으로부터 그리고 15%가 밭으로부터 (Bashkin *et al.*, 2002, Mosier *et al.*, 1998, Zhu *et al.*, 1997) 탈질된다. 이 결과를 적용하여 국내 농경지에서 탈질량을 추정해 보면, 논에서  $80 \times 10^3$  ton N/yr, 밭에서  $24.4 \times 10^3$  ton N/yr로 계산된다. 또한, 농경지 및 축산농가에 살포된 축산분뇨의 20% 정도(IPCC, 1998)가 탈질되는데 그 양이  $52.7 \times 10^3$  ton N/yr에 해당한다. 농경지의 유기질 토양에서 평균 8.5 kg N/ha-yr(2~15 kg N/ha-yr, IPCC, 1998)의 질소가 탈질되고 있으므로, 그 값이  $17.4 \times 10^3$  ton N/yr이다. 따라서, 농경지에서 탈질되는 양은  $174.5 \times 10^3$  ton N/yr이며 농축산업계에서 대기 중으로 탈질되거나 휘발되는 총량은  $407.5 \times 10^3$  ton N/yr이다.

이러한 물질수지로부터 강우 시 비점오염원으로써 연간 하천으로 유입되는 질소는  $169 \times 10^3$  ton N/yr으로 추정된다. 농업지역에서 하천으로 유입되는 질소는 비점오염원에 의한 양이 대부분을 차지한다.

Howarth *et al.*(2002)은 1961년부터 2000년까지 미국에서의 질소 사용량 및 유출량을 조사

하였다. 그 결과에 의하면 1990년대 미국에서는 유입된 질소 중 56%가 작물로 생산되어 7%가 식료품으로 자국 내 생활계로 유입되고 나머지 11%는 수출되고 있으며, 32%가 가축의 사료로 쓰였다고 발표했다. 잔류물로서 매립되는 양은 6%였다. 가축분뇨로 배출된 질소량은 27%였으며 그 중 37%는 대기 중으로 휘발되었다. 가축으로부터 사람의 식료품으로 사용된 양은 5%를 차지했다. 국내의 경우는 총 유입된 질소의 33.5%가 생산물로 생산되어 23.2%가 생활계로 유입되고 10.3%가 잔류물로 매립되었다. 가축분뇨로 배출된 양은 유입량의 31.5%를 차지했으며, 가축으로부터 사람의 식료품으로 사용된 양은 7.7%였다.

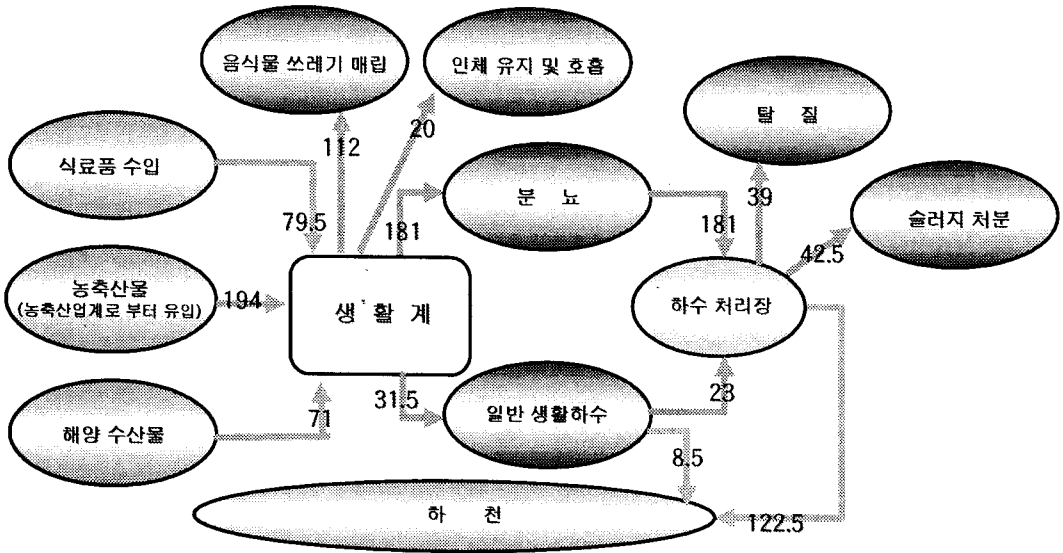
## 2. 생활계 및 산업활동에서 질소의 물질수지

<그림 5>에는 생활계에서의 질소수지를 나타내고 있는데 생활계로 유입되는 질소는 크게 농업, 축산업계로부터 생산되어 유입되는 양과 해산물로부터 유입되는 양 그리고 수입되어 들어오는 식료품에 함유된 질소량으로 구분해 볼 수 있다. 그리고 유출량으로는 인체 유지 및 호흡에 소모되는 양, 분뇨 및 일반 생활하수로 배출되는 양, 그리고 음식물 쓰레기로써 배출, 매립되고 있는 양이 있다.

생활계로 농축산활동으로부터 유입되는 질소의 양은  $194 \times 10^3$  ton N/yr이다. 국내 농축산 활동에 의한 생산량 이외에도 상당한 양의 질소가 해양 수산물로부터 유입되고 있는데 통계 자료에 의하면  $71 \times 10^3$  ton N/yr(해양수산부, 2002)로 추정된다. 그 외에 식품으로 수입되고 있는 질소량은  $79.5 \times 10^3$  ton N/yr(<표 6>)이다.

한국인의 일일 단백질 섭취 권장량은 70 g/capita/day이다. 그러나 실제 섭취되고 있는 단백질 양은 권장량의 117.8%(한국보건위생 연구원, 1996)이며 82.5 g/capita/day에 해당한다. 국내인구가 47,639,618인(환경통계연감, 2001)이고, 단백질 중 14%가 질소에 해당하므로, 1년간 질소 섭취량은  $201 \times 10^3$  ton N/yr이다. 그 중 10%가 체내축적되어 생체활동에 사용되고, 나머지가 분뇨의 형태로 배출되는데 그 양은 10.4 g N/capita/day로, 연간  $181 \times 10^3$  ton N/yr이 배출된다. 이 밖에 잡용수로 배출되는 양이 1.8 g N/capita/day로  $31 \times 10^3$  ton N/yr이다. 따라서 분뇨와 잡용수로 배출되는 총 질소량은 12.2g N/capita/day로 연간  $212.5 \times 10^3$  ton N/yr으로 추정된다(최, 2003). 2001년도 하수도 보급률은 73.2%(환경부, 2002)인데 이를 근거로 생활하수로 발생된 질소의 73.2%인  $23 \times 10^3$  ton N/yr가 하수처리장으로 유입되고 나머지는 하천으로 방류되었다고 추정하였다. 단 분뇨는 전량 수거되어 하수처리장 및 분뇨처리장으로 운반되어 처리되었다고 가정하였다.

<그림 5> 생활계에서 질소수지 (단위 : 10<sup>3</sup> ton N/yr)



<표 6> 식품으로 수입되는 질소량과 자급율

종 류	자급율 (%)	N 수입량 (10 <sup>3</sup> ton N/yr)
보 리	77.2%	1.6
밀	0.1%	44.5
채 소 류	98.3%	0.4
과 실 류	88.9%	0.3
식 고 기	42.3%	8.9
돼지고기	90.8%	2.7
닭 고 기	76.1%	3.4
우 유	77.4%	3.2
소 계		65
어 패 류	76.1%	18.0
해 산 물	121.9%	-3.5
소 계		14.5

출처 : 농생명과학 연구정보센터 (<http://www.alric.org>)

기존 활성슬러지 공법에서 질소 제거효율이 약 30%이고, 고도처리 공정에서 70%이다(최, 2003). 아직 국내 하수처리장이 대부분 활성 슬러지 공정을 사용하고 있으므로, 전체 질소 제거효율을 40%로 추정해 보면, 하수처리장에서 하천으로 유출되는 질소량은 122.5×10<sup>3</sup> ton N/yr이다. 분뇨 및 생활하수로 인해 발생하는 BOD<sub>5</sub>는 730.3×10<sup>3</sup> ton N/yr (42 g/capita/day, 최, 2000)이다. 하수처리장에서 BOD<sub>5</sub> 제거효율이 90%라고 하고 1차 침전조에서 제거되는

BOD<sub>5</sub>는 무시한 채 모두 포기조에서 제거되었다고 가정하면, 발생하는 슬러지량은  $532.4 \times 10^3$  ton VSS/yr이다. 그 중 30% 정도는 혐기성 소화조에서 감량되므로 탈수 케익으로 배출되는 양은  $372.7 \times 10^3$  ton VSS/yr으로 추정되며, VSS(volatile suspended solid)당 질소함량을 12%라고 추정해 보면,  $42.5 \times 10^3$  ton N/yr이 탈수케익의 형태로 배출된다. 나머지  $39 \times 10^3$  ton N/yr이 질산화-탈질을 통해 제거되었다고 추정된다. 하수 슬러지 처리는 발생량 중 7% 정도만이 재이용되고, 73%가 해양투기되고, 12%가 매립되며, 7%가 소각되어(해양수산부, 2002) 대부분이 해양투기에 의존하고 있다. 특히, 해양투기되고 있는 하수 슬러지량은 최근 6년 사이에 연간  $143 \times 10^3$  ton(1995)에서  $1,384 \times 10^3$  ton로 급격히 증가하고 있는 추세이다. 그러나 런던협약 가입국(79개국)중 하수 슬러지의 해양 배출을 허용하는 국가는 일본과 한국뿐이며, 정부도 슬러지의 해양배출의 감소 및 금지를 전면적으로 검토 중이다. 나머지  $112 \times 10^3$  ton N/yr이 음식물 쓰레기로 인한 손실량에 해당된다.

〈표 7〉 생활하수에 의한 질소 배출량

항 목		* g BOD <sub>5</sub> /capital-day, ** g N/capital-day			
		발생원	탈수케익	탈질, 휘발	처리수
기존 활성슬러지	BOD <sub>5</sub> *	42	16.2	19.5	6.3
	T-N**	12.2	2.5	1.2	8.5
BNR	BOD <sub>5</sub> *	42	13.8	24	4.2
	T-N**	12.2	2.1	6.4	3.7

환경부(2002)의 자료에 의하면, 2001년도 음식물 쓰레기 발생량은  $4,101.5 \times 10^3$  ton/yr라고 발표하였는데 음식물 쓰레기 내 질소 함량이 3%정도 이므로  $123 \times 10^3$  ton N/yr의 결과를 나타낸다. 이는 본 연구에서 추정한 값과 거의 비슷한 결과이다. 발생한 음식물 쓰레기 중 95.4%가 매립되며, 2.5%가 소각, 2.1%가 재활용되고 있는 실정이므로(KONETIC, 2002) 거의 대부분이 매립되고 있음을 알 수 있다.

### 3. 임야 및 대지에서 물질수지

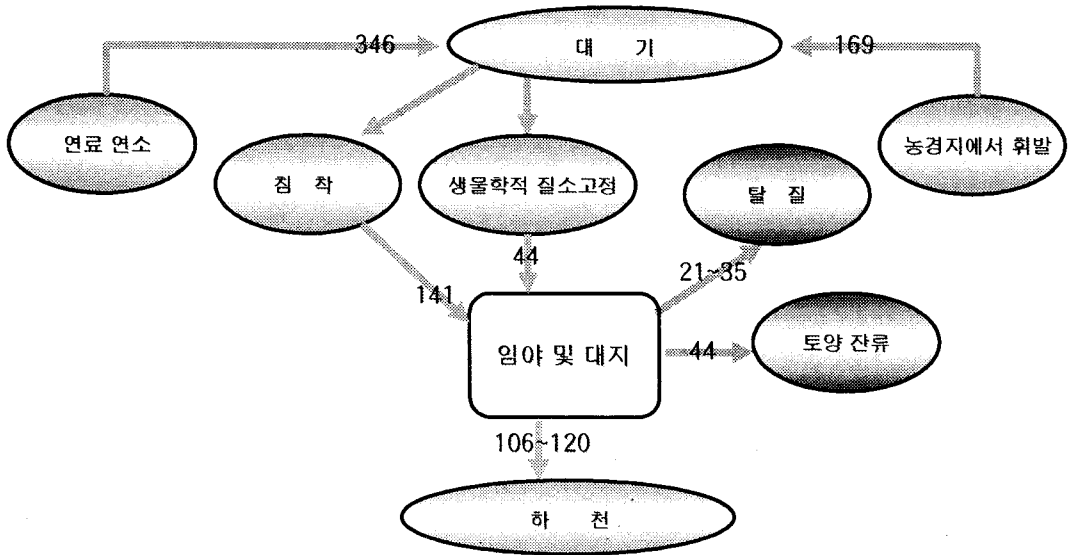
농축산지역을 제외한 임야 및 기타지역에서의 물질 수지를 세워보면 <그림 6>과 같다. 즉 유입되는 양 중에서 대기 중으로부터 침착되거나 생물학적으로 고정된 질소는 탈질되거나 하천 및 호소로 유출 또는 잔류된다.

이(2000)는 1995년부터 1999년까지 cluster analysis(Avila and Alarcon, 1999; Fernau and

Samson, 1990a; 1990b; Moody and Samson, 1989)를 이용하여 한반도에서의 질소 침착량을 추정하였는데, 농축산업계에서 대기 중으로 방출된  $\text{NH}_3\text{-N}$   $150 \times 10^3$  ton N/yr 중 60%에 해당하는  $90 \times 10^3$  ton N/yr이 침착되고, 도시지역 및 공업단지에서 주로 방출되는  $\text{NOx-N}$   $383 \times 10^3$  ton N/yr 중 18%인  $70 \times 10^3$  ton N/yr이 침착된다고 추정하고 있다.

상기 자료를 2001년도 통계자료에 적용하여 보았는데 암모니아 휘발량은  $169 \times 10^3$  ton N/yr로 과거보다  $19 \times 10^3$  ton N/yr 더 높아졌으며, 방출된  $\text{NOx-N}$ 은  $346 \times 10^3$  ton N/yr(환경 통계연감; 2002)으로  $37 \times 10^3$  ton N/yr 가량 낮은 값이다. 따라서 이 결과를 토대로 추정된  $\text{NH}_3\text{-N}$ 형태로 침착되는 양은  $101.5 \times 10^3$  ton N/yr이며,  $\text{NOx-N}$ 형태로 침착되는 양은  $62 \times 10^3$  ton N/yr으로 총  $163.5 \times 10^3$  ton N/yr로 계산된다. 그 중  $22.5 \times 10^3$  ton N/yr(박, 2001)은 앞서 농경지로 침착된 양으로 추정하였고, 나머지  $141 \times 10^3$  ton N/yr이 임야 및 기타지역으로 침착된 것으로 추정하였다.

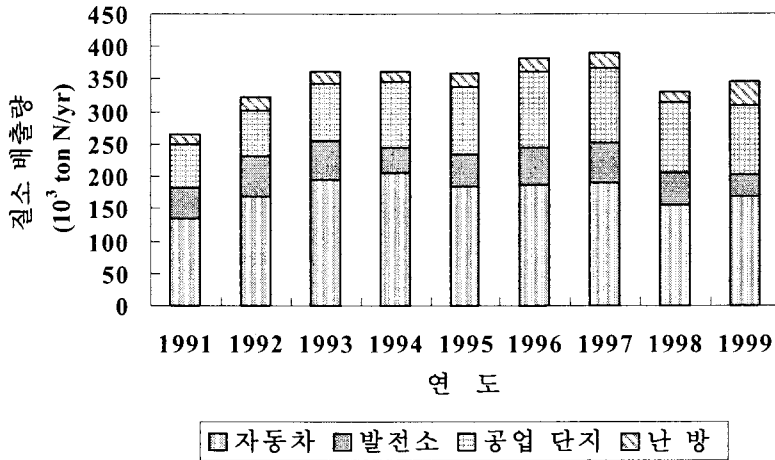
<그림 6> 임야 및 기타 비점오염 지역에서의 물질수지 (단위 :  $10^3$  ton N/yr)



<그림 7>에는 최근 10년간 배출되고 있는  $\text{NOx-N}$ 의 변화를 나타내고 있는데, 주 배출원으로 이동 오염원인 자동차와 선박, 고정오염원인 공업단지, 난방, 발전 순이었고 1997년까지 꾸준히 증가하다가 그 이후 약간의 감소세를 보이고 있다.

가축의 분뇨나 비료 등에서 주로 휘발되는  $\text{NH}_3\text{-N}$ 의 경우 대부분 강우 시 습식상태로 침착된다.  $\text{NOx-N}$ 의 경우 주로 건조된 입자형태로 침착되는데, 주로 발생원 인접지역인 도시 및 공업단지 등에 건조상태로 침착된다.

<그림 7> 최근 10년 동안 NOx-N의 배출량의 변화



전체 침착량 중 건조침착상태가 30%이고 강우에 의해 침착되는 양이 70%라 추정하면(이, 2000)  $49 \times 10^3$  ton N/yr가 건조상태로  $114.5 \times 10^3$  ton N/yr가 습식상태로 침착된다. 농경지로 침착( $22.5 \times 10^3$  ton N/yr)되는 형태는 대부분 습식상태이므로, 전량  $\text{NH}_3\text{-N}$ 형태로 침착되었다고 가정하였고 건조상태로 침착되는 양( $52.5 \times 10^3$  ton N/yr)은 전량 임야 및 대지지역(도시 및 공단지역 포함)에 침착되었다고 가정하였다. 따라서 농경지를 제외한 지역에 습식상태로 침착된 양은  $92 \times 10^3$  ton N/yr이다.

습식상태로 침착된 질소  $92 \times 10^3$  ton N/yr 중 31%(건교부, 2002)에 해당하는  $28.5 \times 10^3$  ton N/yr는 집중호우로 인하여 바다로 유실되었을 것으로 추정되며, 나머지 69%인  $63.5 \times 10^3$  ton N/yr가 하천이나 호소 또는 지하수로 유입되거나 질산화-탈질과정으로 인하여 대기 중으로 방출되는 것으로 산출된다.

Venterink *et al.*,(2003)은 습식상태의 임야 및 초원 등지에서의 탈질량을 추정하기 위한 jar-test를 실시하였는데, 그 결과에 의하면 토양에서의 탈질은 용존산소가 적어지는 밤에 주로 발생하며, 표층보다는 토양 저부에서 주로 발생하고 있음을 입증하였다. Tilsner *et al.*,(2003)은, lab experiments를 통하여 토양으로부터 탈질량을 측정하였는데, slurry 상태에서  $8.8$  N kg/ha-yr이, 일반 건조상태에서는  $3.4$  N kg/ha-yr이 탈질된다고 발표하였다. 이를 근거로 하여 도시나 공단지역의 비포장지역과 하천 및 임야 등의 늪지역(6,971,647 ha)에서 탈질되는 양을  $5 \sim 3$  kg N/ha-yr라고 가정하면 총 약  $21 \sim 35 \times 10^3$  ton N/yr가 탈질되고 있음으로 추정된다. 대기 중으로부터 습식형태로 침착된 양 중 탈질되고 남은 부분인  $28.5 \sim 42.5 \times 10^3$  ton N/yr은 토양에 잔류하고 있거나 하천으로 유출되는 양인데 그 정확한 거동을

파악하기가 어려워 전량 유출되었다고 추정하였다. 건조된 입자형태 및 가스 상태로 침착된 질소는 주로 토양표면이 포장되어 있는 도시나 공단지역에 침착된 양이므로 탈질되기보다는 강우 시 비점오염원으로 유출될 가능성이 더 높아 전량 유출되었다고 가정하였다. 따라서 임야 및 기타지역에서 하천으로 배출되는 질소는  $106\sim120\times10^3$  ton N/yr로 추정된다. <표 8>에는 침착과 탈질량의 산출근거를 나타내고 있다.

<표 8> 국내 침착되는 질소량과 탈질되는 양의 추정

구 분	대기 침착량				탈 질 량 (임 야)
	농축산업 지역		임야 및 대지		
	습 식	건 식	습 식	건 식	
면 적 (ha)	2,042,463		7,911,337		6,510,026
kg N/ha-yr	11	-	11.6	6	5~3
$10^3$ ton N/yr	22.5	-	92	49	21~35
자료 출처	박 (2001)		이 (2000)		Tilsner <i>et al.</i> (2003)

#### 4. 국내의 유입되는 질소로 인한 하천에서의 영향

<표 9>에는 대한민국(남한) 전체에서의 질소수지를 요약하여 나타내었다. 국내 유입된 총 질소량은  $1,194.5\times10^3$  ton N/yr( $120$  kg N/ha-yr) 였으며, 농축산업계로 유입된 양이  $859\times10^3$  ton N/yr(71.9%), 생활계가  $150.5\times10^3$  ton N/yr(12.6%)이고, 임야 및 대지가  $185\times10^3$  ton N/yr(15.5%)이다. 그 중  $408\sim422\times10^3$  ton N/yr(34.2~35.3%)가 하천을 통해 해양으로 유출되었고 대기 중으로 탈질되거나 휘발된 양은  $467.5\sim481.5\times10^3$  ton N/yr(39.1~40.3%) 이었으며, 나머지가 매립, 소각, 해양투기된 양이다.

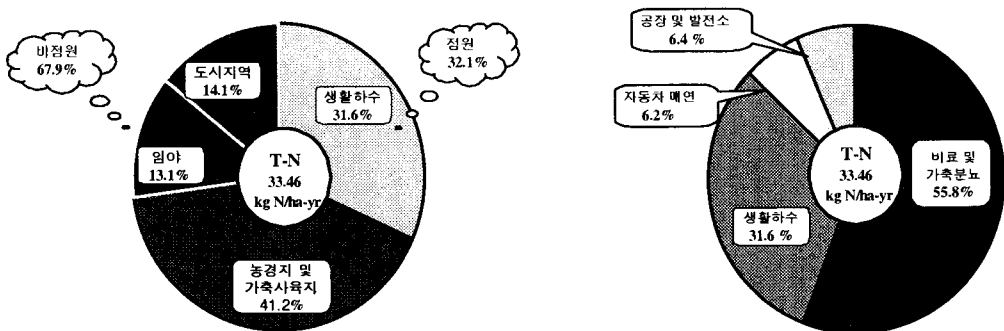
Howarth *et al.*(2002)에 의하면, 미국에서 하천으로 유출되는 질소 중 54%가 농축산활동에 의해 유출되며, 30%가 석유 등의 연료의 연소에 의하여 대기 중으로 방출되었다가 침착되어 유출되는 양이고, 나머지 16% 정도가 생활하수에 의해 유출되는 양이라고 발표하였다. 국내 하천에서 바다로 유출되는 질소량  $408\sim422\times10^3$  ton N/yr 중 비점오염원에 해당하는 부분은  $275\sim289\times10^3$  ton N/yr(68.5%)이며, 그 중 농경지에서 유출되는 부분이  $169\times10^3$  ton N/yr이고, 도시 및 공단지역에서 유출되는 부분이  $58.5\times10^3$  ton N/yr이며, 임야에서 배출되는 양이  $47.5\sim61.5\times10^3$  ton N/yr이다.  $44.7\times10^3$  ton N/yr는 슬러지 형태로 직접 바다로 해양투기 되고 있다. 그림 8에는 하천에서 바다로 유출되는 질소의 원단위별 기여도를 나타낸 결과이다. 국내 단위 면적당 하천을 통해 바다로 유출되는 양은  $33.46\times10^3$  ton N/yr이며, 지역별로 볼 때에 농경지 및 가축사육지(41.2%), 생활하수(31.6%), 도시지역 비점오염원(14.1%), 임야에서

의 비점오염원(13.1%) 순으로 나타난다. 배출원별로는 비료 및 가축분뇨(55.8%), 생활하수(31.6%), 자동차 매연(6.2%), 공장 및 발전소(6.4%) 순이다. 비점오염원이 차지하는 비율은 67.9%였으며, 그 중 비료 및 가축분뇨 등 농축산활동에 의한 영향이 60%로 하천에서의 질소 농도에 가장 큰 부분을 차지하고 있다.

<표 9> 대한민국에서 질소 물질수지

항 목		질소량 (103 ton N/yr)			
		계	농경지	생활계	임야 및 대지
유입	질소 침착	163.5	22.5		141
	생물학적 질소 고정	111.5	67.5		44
	비료 공급	375	375		
	사료 공급	394	394		
	해양 수산물 생산	71		71	
	음식물 수입	79.5		79.5	
	소 계	1,194.5	859	150.5	185
유출	암모니아 휘발량	169	169		
	탈 질 량	298.5~312.5	238.5	39	21~35
	하천을 통한 해양 방류 (NPS로 하천유출)	408~422 (275~289)	171 (169)	131	106~120 (106~120)
	매 립	242.5	86.5	112	44
	기 타	62.5		62.5	
	소 계	1,194.5	665	344.5	185

<그림 8> 국내 하천의 오염원단위 질소 부하량



<표 10>에는 본 연구에서 추정한 비점오염원으로서 하천 유입량과 실측자료를 비교하였는데 대체적인 범위로 볼 때에는 유사한 결과로 보여진다. 단지 논과 밭지역에서는 본 연구에 의한 결과가 비교적 큰데 그 이유는 집중 호우 시 바다로 직접 유출되는 양과 비료 및 가축분뇨에 의한 영향을 많이 포함하고 있기 때문으로 보이는데 앞으로 면밀한 비교가 필요하다.



<표 10> 토지이용에 의한 비점오염원의 발생원단위 (kg/km<sup>2</sup>-yr)

구 분	T-N 발생량 (kg N/km <sup>2</sup> -yr)			
	논	밭	임 야	대 지
서운수 등 (1987)	1,205			
구분경 (1988)	925	490	59	2,206
농업진흥공사 (1988)	3,322			
안 동 (1988)	850	850	204	15,801
서운수 등 (1989)		2,263		
경제기획원 (1989)		2,599		
이창기 등 (1990)	2,526			
신동석 등 (1990)	3,898			
신상철 등 (1992)	2,373	2,263	1,606	
유재근 (1993)		5,001		
농림 수산부 (1993)	3,267	2,993	1,694	3,668
본 연구	8,274 <sup>a)</sup>		730~945	7,657

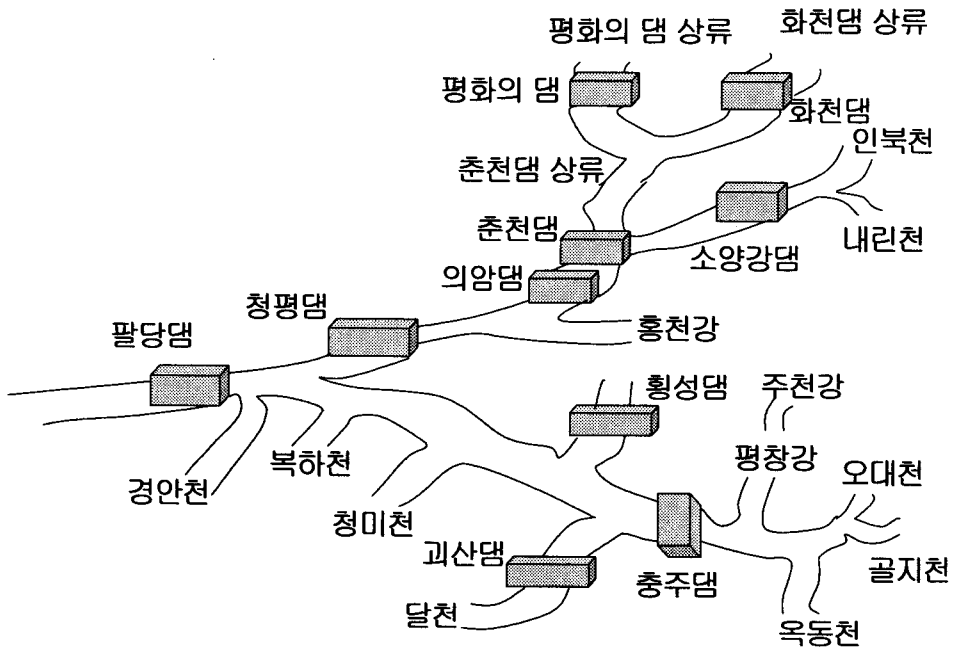
a) 논과 밭 그리고 가축 사육지를 포함하였음.

<표 10>의 결과를 이용하여 한강유역 호소에서 연평균 질소농도를 추정하였다. 그림 9에서 나타난 바와 같이 한강의 중상류 유역은 크게 북한강 유역과 남한강 유역으로 나뉘어지며 팔당에서 만나게 된다. 표 11에서는 한강 각 유역에서의 토지이용별 면적과 실측된 질소농도 및 본 연구의 결과로 추정되는 농도를 나타내고 있다. 예측농도의 추정방법은 아래와 같다. 먼저, 본 연구에서 추정되는 토지이용에 따른 비점오염원으로 유출되는 질소량(<표 10>)에 각 유역에서 토지이용별 면적(<표 11>)을 곱하여 유출되는 질소량(kg N/yr)을 산출하였다. 각 유역에서의 강우유출량은 각 유역 전체면적(수역, 나지, 습지면적 포함)에 한강유역 연평균 강우량인 1,287 mm/yr를 곱하였으며, 그 중 43%는 증발산량으로 손실되며 나머지 57%가 하천으로 유출되는 것으로 추정하였다(건교부, 2002). 위와 같이 계산된 질소량과 강우유출량을 이용하여 농도를 산출해 내어 각 호소에서 실측된 질소농도와 비교하여 그 결과를 <표 11>에 나타내었다. 각 유역에서 유출되는 질소는 상류지역에서 하류지역으로 강줄기를 따라 이동하며 이동하는 중에 손실되는 양은 없다고 가정하였다. 따라서 하류의 호소로 갈수록 상류유역에서 발생된 질소량은 누적된다. <표 11>에 나타낸 결과를 보면 실측치보다 예측치가 다소 크게 나타나고 있는데 그 원인은 하천이나 호소의 저부에서 발생하는 탈질량을 고려하지 않았기 때문으로 추정된다. 또한 화천댐의 예측농도가 실측농도보다 2배 정도 크게 나왔는데, 이는 대기 중으로부터 침착되는 양 및 농경지에서 유출되는 질소량(kg N/ha/yr)을 전국 연평균 값으로 환산하여 적용하였기 때문에 발생한 오차로 추정된다. 화천댐유역의 경우

지역 특성상 공단지역 및 도심으로부터 멀리 떨어져 있고 비료사용량 및 가축사육두수가 다른 지역에 비해 현저히 적으므로, 본 연구에서 추정된 질소량보다 더 적은 질소가 유출된다. 전체적인 결과로 보아 본 연구에서 추정된 발생원단위별 질소 유출량은 실측결과와 유사하다고 판단된다.

또한 하류지역으로부터 바다로 유출되는 질소농도를 추정하였다. 하천에서 바다로 유출되는 질소량이  $408\sim 422\times 10^3$  ton N/yr (<표 9>)이고, 국내 수자원 총량( $1,276\times 10^8$  m<sup>3</sup>/yr) 중 증발산량을 제외한 하천 유출량이  $731\times 10^8$  m<sup>3</sup>/yr임을 적용하여 추정하면 5.6~5.8 mg N/L의 결과를 나타낸다. 한편 한강하류(가양) 및 영산강, 삼교천 하류 등 하천하류부에서의 질소농도는 4.8~6.3 mg N/L의 범위를 나타내고 있어 본 연구에 의한 추정방법의 적용가능성을 알 수 있다.

<그림 9> 한강유역 모식도



〈표 11〉 한강유역 호소에서 질소농도 예측치와 실측치의 비교

유역	유역 면적 <sup>a)</sup> , km <sup>2</sup>					예측농도	실측농도 <sup>c)</sup>
	도시	산림	논	밭	전체면적 <sup>b)</sup>		
골지천유역	2.4	844.3	11.7	96.4	973	2.14~2.40	
오대천유역	0.7	400.8	2.4	42.1	452	2.10~2.36	
오대천합류후	7.6	881.9	17.4	102.0	1,023	2.16~2.42	
주천강유역	3.8	528.8	13.2	54.6	607	2.17~2.42	
평창강유역	11.3	992.4	20.1	123.7	1,166	2.22~2.47	
옥동천유역	1.2	471.2	4.6	15.8	495	2.13~2.39	
평창강합류후	27.1	1,611.3	46.7	200.5	1,944	2.21~2.47	
충주댐	4.4	22.9	0.3	11.4	43	2.23~2.48	2.19
괴산댐유역	7.5	551.2	16.2	92.2	676	2.28~2.53	
괴산댐	27.4	670.7	34.3	183.0	937	2.43~2.67	
달천합류점	4.7	398.6	12.7	92.1	524	2.47~2.71	
횡성댐유역	0.3	185.0	1.0	20.9	208	2.46~2.70	
횡성댐	32.3	996.3	28.3	204.6	1,283	2.54~2.78	
청미천유역	14.6	303.0	19.1	254.0	605	2.72~2.96	
청미천합류후	14.9	210.8	18.6	219.6	494	2.87~3.10	
북하천유역	13.0	148.3	11.3	129.6	309	2.95~3.18	
북하천합류후	7.5	512.2	13.1	121.1	672	2.96~3.19	
평화의댐상류유역	0.2	178.2	5.2	2.2	189	1.39~1.67	
평화의댐	0.1	98.6	1.2	0.5	103	1.30~1.58	
화천댐상류유역	9.4	639.2	48.6	39.9	760	2.28~2.53	
화천댐	8.2	674.1	44.8	31.5	775	2.18~2.43	1.20
춘천댐상류	1.3	39.1	3.9	5.1	53	2.07~2.32	
인북천유역	9.4	839.2	40.7	32.9	931	1.89~2.16	
내린천유역	3.9	1,052.7	15.8	9.7	1,084	1.27~1.55	
내린천합류점	4.7	601.2	17.4	11.9	679	1.33~1.61	
소양강댐	5.7	59.8	8.0	11.2	89	1.60~1.87	1.41
춘천댐	18.6	77.0	13.2	16.3	139	1.86~2.12	
의암댐	7.8	513.5	29.4	19.6	583	1.87~2.13	1.72
홍천강유역	20.4	1,376.2	87.6	70.9	1,566	2.15~2.41	
홍천강합류후	1.1	99.8	7.8	3.9	120	2.14~2.40	
청평댐	13.1	548.3	31.8	32.7	641	1.96~2.22	1.73
경안천유역	39.3	377.8	42.7	51.7	531	3.48~3.69	
북한강합류점	0.6	31.3	1.7	1.2	44	3.34~3.55	
팔당댐	159.1	492.0	45.5	81.5	816	2.67~2.90	2.49

a) 수자원 종합정보 (2002), <http://www.wamis.go.kr>

b) 수역, 나지, 습지면적을 포함하였음.

c) 환경부 (2002), 환경통계연감

## IV. 결론

- (1) 2001년 우리 나라 토양에 유입된 질소량은 생물학적으로 고정된  $111.5 \times 10^3$  ton N/yr, 비료로 주입된  $375 \times 10^3$  ton N/yr, 사료로 공급된  $394 \times 10^3$  ton N/yr, 대기 중으로 방출되어 지표면으로의 침착된  $163.5 \times 10^3$  ton N/yr, 해양 수산물로 반입된  $71 \times 10^3$  ton N/yr, 해외로부터 수입된 식품  $79.5 \times 10^3$  ton N/yr로 총  $1,194.5 \times 10^3$  ton N/yr(120 kg N/ha-yr)이었다.
- (2) 유입된 질소 중 대기 중으로 휘발되거나 탈질된 양은  $468.8 \sim 482.8 \times 10^3$  ton N/yr이며, 그 중  $163.5 \times 10^3$  ton N/yr은 다시 지표면으로 침착되었다. 하천을 통해 방류된 양이  $408 \sim 422 \times 10^3$  ton N/yr로 추정되었으며 나머지  $305 \times 10^3$  ton N/yr이 매립, 소각, 또는 해양투기 되는 것으로 추정되었다.
- (3) 하천에서 해양으로 유출되는 강수량( $731 \times 10^8$  m<sup>3</sup>/yr)을 기준으로 할 때에 연평균 질소농도는 5.7 mg/L로 추정된다. 이는 강 하류에서 실측된 연평균 질소농도 4.8~5.9 mg/L와 유사하다.
- (4) 하천을 통해 해양으로 방류된 질소 중 31.6%가 생활하수로부터 배출되며, 농경지 및 가축 사육지로부터 41.2%, 임야로부터 13.1%, 도시지역으로부터 14.1%가 배출되는 것으로 추정되었다. 오염원별 기여도는 비료 및 가축분뇨(55.8%), 생활하수(31.6%), 연료의 연소(12.6%) 순이었다. 비점오염원에서 유출된 양이 차지하는 비율은 67.9% 이었다.
- (5) 국내 비점오염원으로부터 하천으로 유출되는 질소는 농경지가  $169 \times 10^3$  ton N/yr(8,274 kg N/km<sup>2</sup>-yr)으로 가장 많았으며, 도시지역에서 배출된 양이  $58.5 \times 10^3$  ton N/yr(7,657 kg N/km<sup>2</sup>-yr), 임야에서 배출된 양이  $54.5 \times 10^3$  ton N/yr(837.5 kg N/km<sup>2</sup>-yr)으로 추정되었다.

감사

본 연구는 KIST의 금수강산 21의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 건설교통부(2002) 한국수문조사연보-우량편, 수위편, 유량편.
- 구본경 (1988) 유역 내 토지이용상태가 수질에 미치는 영향에 관한 연구 - 의암호유역을 중심으로 -
- 권순국(1998) 우리 나라 비점오염원 수질오염 관리의 문제점과 개선방안, *대한환경공학회지*, 20(11), pp. 1497-1510.
- 농림부(2003) 통계로 보는 세계 속의 한국농업.
- 심재면 · 박순웅(2001) 남한 산림의 질소와 염기성 양이온의 흡수량 추정, *한국생태학회지*, 24(1), pp. 51-59.
- 이영희(2000) 한반도에서의 질소 침착량의 추정, 서울대학교 박사학위 논문.
- 최의소(2003) 상하수도 공학, 청문각.
- 최의소(1991) 영양염류 원단위 산정에 관한 연구, 한국환경과학연구협의회 보고서.
- 최지용 · 신은성(1998) 농업지역 비점오염원 관리방안 연구, 한국환경정책 · 평가연구원 보고서.
- 최지용 · 신은성(1999) 국토환경용량을 고려한 축산오염 관리방안 연구, 한국환경정책 · 평가연구원 보고서.
- 홍성구(1989) 농경지로부터의 오염물질 유출부하특성 - TKN 및 TP를 중심으로 -
- 환경부(2003) 낙동강수계 비점오염원 관리방안을 위한 조사사업.
- 환경부(2000) 팔당상수원 비점오염원 최적관리사업 타당성조사 및 기본계획수립용역.
- 환경부(2002) 전국폐기물통계조사 요약 보고서.
- 환경부(2002) 환경통계연감.
- Bouwman A.F., Lee D.S., Asman W.A.H., Dentener F. J., Van der Hoek K.W. and Oliver J.G.J. (1997) A global high-resolution emission inventory for ammonia. *Global biogeochem. Cycles* 51, pp. 561-587.
- Bouwman A.F. and Van der Hoek K.W. (1991) Analysis of soil and water borne emissions of nitrous oxide and methane in the Netherlands. RIVM report no. 736301010. National Institute of Public Health and Environmental Protection, Bilthoven, the Netherlands.
- Bashkin, V.N., Park S.U., Choi M.S., and Lee C.B. (2002) Nitrogen budgets for the Republic of Korea and the Yellow Sea region. *Biogeochemistry* 57&58: pp. 387-403.
- Choi E., Eum Y.J., Gil K.I. and Oa S.W. (2003) High strength nitrogen removal from nightsoil and piggery wastes, *Proc. of strong N and agro 2003*, pp. 131-138.

- Cleveland C.C., Townsend A.R., Schimel D.S., Fisher H., Howarth R.W., Hedin L.O., Perakis S.S., Latty E.F., Von Fischer J.C., Elseroad A. and Wasson M.F. (1999) Global patterns of terrestrial biological nitrogen (N<sub>2</sub>) fixation in natural ecosystems. *Global biochem. cycles* 13 pp. 623-645.
- Galloway J.N., Schlesinger H.L., Michaels A. and Schnoor J.A. (1995) Nitrogen fixation: atmosphere enhancement - environmental response. *Global biogeochem. cycles* 9 pp. 235-252.
- Galloway J.N., Zhao D.W., Thomson V.E. and Chang L.H. (1996) Nitrogen mobilization in the United States of America and the people's Republic of China. *Atmospheric environment* 30 pp. 1551-1561.
- Howarth, R.W., Boyer, E.W., Pabich W.J. and Galloway, J.N. (2002) Nitrogen use in the United States from 1961-2000 and potential future trends. *Royal Swedish Academy of Sciences 2002*. pp. 88-96.
- Howarth, R.W. (2002) Human acceleration of the Nitrogen cycle: Drivers, consequences, and steps toward solutions. *Proc. of strong N and agro 2003*. pp. 3-12.
- Howarth, R. and Rielinger D.M. (2002) Nitrogen from the atmosphere : Understanding and reducing a major cause of degradation in our coastal waters. *Science and Policy Bulletin* 8.
- IPCC (1996) Guidelines for national greenhouse gas inventories. OECD/OCDE, Paris.
- IPCC(1997) Intergovernmental panel on climate change guideline for national greenhouse gas inventories. OECD, Paris, Chap. 4 Agriculture: nitrous oxide from agricultural soils and manure management.
- Kimble J.M., Lal R., Follett R.F. (2002) Agricultural practices and policies for carbon sequestration in soil, Lewis publisher.
- Mosier A.R. (2001) Exchange of gaseous nitrogen compounds between agricultural systems and the atmosphere. *Plant and Soil*. 228 pp. 17-27.
- Mosier A.R. (1998) Closing the global N<sub>2</sub>O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. *Nutrient cycling in agro ecosystems* 52: pp. 225-248.
- Mosier A., Kroeze C., Nevison C., Oenema O., Seitzinger S. and Cleemput O. V., (1998) Closing the global N<sub>2</sub>O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. *Nutrient cycling in agroecosystems* 52: pp. 225-248.
- Park S.U. (Ed)(1998) Research and development on basic technology for atmospheric environment in global scale: development of technology for monitoring and prediction of acid rain. Ministry of environment, Republic of Korea, pp. 602.

- Tilsner J., Wrage N., Lauf J. and Gebauer G. (2003) Emission of gaseous nitrogen oxides from an extensively managed grassland in NE Bavaria, Germany, I. Annual budgets of N<sub>2</sub>O and NO<sub>x</sub> emissions, *Biogeochemistry* 63: pp. 229-247.
- Tilsner J., Wrage N., Lauf J. and Gebauer G. (2003) Emission of gaseous nitrogen oxides from an extensively managed grassland in NE Bavaria, Germany, II. stable isotope natural abundance of N<sub>2</sub>O, *Biogeochemistry* 63: pp. 249-267.
- Van der Hoek K.W. (1994) Berekeningsmethodiek ammoniamemissie in Nederland voor de jaren 1990, 1991 en 1992. *RIVM report no. 773004003*.
- Venterink H.O., Hummelink E. and Van der hoorn M.W. (2003) Denitrification potential of a river floodplain during flooding with nitrate-rich water: grasslands versus reedbeds *Biogeochemistry* 65: pp. 233-244.
- Venterink H.O., Davidsson T., Kiehl K. and Leonardson (2002) Impact of drying and re-wetting on N,P and K dynamics in a wetland soil. *Plant soil* 243: pp. 119-130.
- Vitousek P.M., Aber J., Baley S.E., Howarth R.W., Likens G.E., Matson P.A., Schindler D.W., Schlesinger W.H. and Tilman G.D. (1997) Human alteration of global nitrogen cycle: Causes and consequences. *Issues in ecology* 1 pp. 1-15.
- Xing G.X. and Zhu Z.L. (2002) Regional nitrogen budgets for china and its major watersheds. *Biogeochemistry* 57/58: pp. 405-427.
- Zhu Z.L. (Ed) (1997) Nitrogen balance and cycling in agroecosystems of china, *kluwer academic publisher*, pp. 355.